МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 681.51:621.95.01 10.23947/1992-5980-2017-17-1-75-84

Об одном частном случае синтеза системы управления процессом обработки металлов точением*

В. П. Лапшин[1], Т. С. Бабенко[2], В. В. Христофорова[3]**

[1,2,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

On a special case of synthesis of metal turning process control system ***

V. P. Lapshin[1], T. S. Babenko[2], V. V. Khristoforova[3]**

[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Одним из широко распространенных методов точной обработки металлов точением, при условии достаточно сложной формы обрабатываемой заготовки, является метод многократных повторов точения. Сутью этого метода является срезание очень тонкого слоя обрабатываемого материала. При этом, за счет последующих проходов режущего инструмента вдоль изделия, достигается требуемая глубина обработки. Существенным недостатком такого способа точения деталей сложной формы является низкая эффективность, обусловленная большим временем обработки.

Материалы и методы. Повышение эффективности возможно за счет внедрения новых современных методов управления процессами обработки. В качестве таких методов могут быть использованы современные подходы к анализу и синтезу систем управления сложными технологическими процессами, основанные на раскрытии синергетической концепции управления. Особенностью этого подхода является выявление и учет внутренних обратных связей, стабилизирующих процесс обработки. На основании проведенного анализа синтезируется управление, которое представляет собой новые нелинейные отрицательные обратные связи, задачей которых является обеспечение требуемого уровня качества и эффективности технологического процесса при условии асимптотической устойчивости требуемых аттракторов.

Результаты исследования. Для моделирования системы и учета влияния параметров двигателей, разработана принципиально новая математическая модель, учитывающая нелинейные процессы изменения сил. Проведен анализ динамики системы управления обработкой металлов точением с оценкой качества технологического процесса. В работе применен синергетический подход для построения оптимальной системы управления технологическим процессом с учетом взаимосвязанности приводов, обеспечивающих вращение заготовки и подачу. Проведен анализ динамики синтезированной системы со сравнительной оценкой прироста качества.

Обсуждения и заключения. Синтезированный синергетический закон управления существенно изменил свойства системы управления технологическим процессом обработки металлов точением. Сравнительный анализ полученных зависимо-

Introduction. One of the widely accepted methods of the precision metal turning provided a fairly complex shape of the workpiece is the method of multiple repetitions of turning. The principle of this method is cutting an extra thin layer of the work material. At that, the required operating depth is obtained through the successive passes of the cutting tool along the workpiece. An essential fault of this method of complex parts processing is low efficiency due to the long processing time.

Materials and Methods. The improvement of efficiency is possible through the introduction of new modern methods of the treatment process control. Modern approaches to the analysis and synthesis of the control systems of complex operating procedures based on the development of the synergetic concept of management could be used as such methods. A special feature of this approach is the identification and control of the inherent feedbacks stabilizing the treatment process. On the basis of the analysis conducted, the control that is a new nonlinear degenerative feedback is synthesized. Its task is to assure adequate quality and efficiency of the processing under the asymptotic stability of the required attractors.

Research Results. A fundamentally new mathematical model considering non-linear processes of the force changes is developed to simulate the system and allowance for the effect of the engine parameters. The analysis of the dynamics of the metal turning control system with the evaluation of the process quality is carried out. A synergistic approach to the construction of the optimal production control system considering the interconnectivity of the actuators providing the workpiece rotation and supply is used. The analysis of the synthesized system dynamics with the comparative evaluation of the quality growth is conducted.

Discussion and Conclusions. The synthesized synergetic control law changes fundamentally the properties of the metal turning control system. A comparative analysis of the obtained dependences allows observing a substantial increase in the processing

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: i090206.lapshin@yandex.ru, Tanya-babenko_2017@mail.ru, Nikaapp@rambler.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

стей позволил констатировать существенное повышение точности обработки. При этом синтезированное управление системой асимптотически приближает отклонение припуска к значению, которое задавалось как одна из констант по каналу управления скоростью подачи.

accuracy. At that, a synthesized system control asymptotically approaches the deviation of the allowance to the value specified as one of the constants on the control channel of the feed velocity.

Ключевые слова: процесс резания, система управления, синергетический синтез, подача, жесткость заготовки.

Keywords: cutting process, control system, synergetic synthesis, feed, workpiece stiffness.

Введение. При решении задач синтеза систем управления процессами обработки материалов в машиностроении часто возникают особые задачи, требующие новых подходов к формированию управляющих воздействий. Одним из таких случаев является вариант обработки маложесткой детали точением. Особенностью такого рода обработки является переменная вдоль линии подачи жесткость изделия, которая может привести к переменному, изменяющемуся вместе с жесткостью, качеству поверхности получаемого изделия. Для нивелирования такого качества в современных станочных системах применяются многократные проходы инструмента при точении. Предлагаемый подход позволит повысить производительность крупносерийного производства.

Анализ динамики нелинейных процессов, протекающих в системе, включающей в себя заготовку и обрабатывающий инструмент, проведен авторами несколько ранее и не включен в представляемую статью. Ознакомиться с этим анализом можно в опубликованной ранее работе [1]. Отметим, что анализ протекающих, как в зоне резания, так во всей системе процессов, производился на основе методов и форм нелинейного анализа процессов обработки металлов, применяемых в научной школе профессора В. Л. Заковоротного [3–6].

После проведенного анализа стала актуальной задача синтеза системы управления со сложным, нелинейным характером процессов, проходящих в зоне резанья. Одним из современных подходов к синтезу подобных систем управления является метод синергетического синтеза или аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), предложенный А. А. Колесниковым [7, 8]. Надо отметить, что синтез систем управления процессами обработки деталей на металлорежущих станках осуществлялся и ранее. В работах [9,10] описано решение подобных задач, но в такой постановке они не рассматривались. Вместе с тем, решение данной частной задачи можно обобщить и применить в других случаях синтеза законов управления.

Синтез системы управления процессом обработки.

Рассмотрим процесс точения для случая, когда по мере увеличения подачи будет увеличиваться жесткость заготовки, учитываемая в силовой реакции со стороны процесса резания (рис. 1).

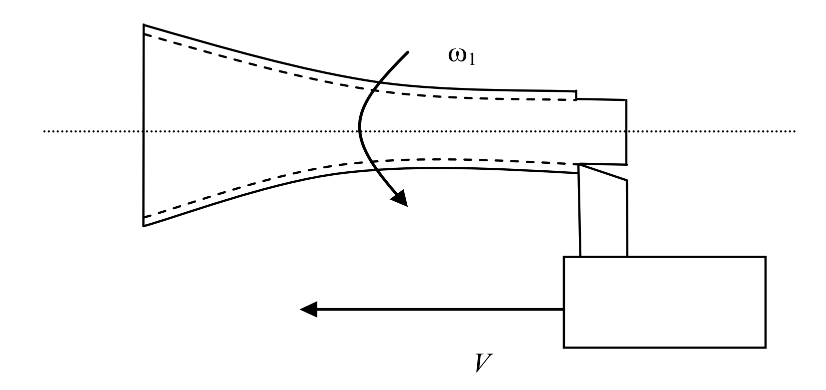


Рис.1. Схема процесса обработки

Fig.1. Treatment process chart

На рис. 1 ω_1 — угловая скорость вращения обрабатываемой детали, обеспечиваемая приводом вращения. Скорость подачи V связана с угловой скоростью вращения ротора двигателя подачи ω_2 некоторым суммарным коэффициентом передачи редуктора и винтовой пары станка.

Для дальнейших рассуждений используем полученное ранее выражение, описывающее формирование силовых реакций со стороны процесса, которое в [1] представлено как:

$$F(\omega_1,\omega_2)=\frac{[350+150(1-e^{-0.1K_r\int_0^t\omega_2 dt})]K_r\omega_2}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t\omega_2 dt})]\omega_1}, \quad (1)$$

где K_r — коэффициент передачи редуктора и винтовой пары станка, ω_1 — угловая скорость вращения обрабатываемой заготовки.

Исходя из вышеизложенного, общая модель, отражающая связанную динамику системы управления, примет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{U_1}{Ce^{(1)}}&=T_{эм}{}^{(1)}T_э{}^{(1)}\frac{d^2\omega_1}{dt^2}+T_{эм}{}^{(1)}\frac{d\omega_1}{dt}+\omega_1+T_{KL}{}^{(1)}\frac{dF(\omega_1,\omega_2)}{dt}+T_{KR}{}^{(1)}F(\omega_1,\omega_2)\\ \frac{U_2}{Ce^{(2)}}&=T_{эм}{}^{(2)}T_э{}^{(2)}\frac{d^2\omega_1}{dt^2}+T_{эм}{}^{(2)}\frac{d\omega_2}{dt}+\omega_2+T_{KL}{}^{(2)}\frac{dF(\omega_1,\omega_2)}{dt}+T_{KR}{}^{(2)}F(\omega_1,\omega_2)\end{aligned} \quad (2)$$

где $T_э{}^{(1)}=\dfrac{L_1}{R_1}$ — электрическая постоянная двигателя обеспечивающего вращение заготовки; $T_э{}^{(2)}=\dfrac{L_2}{R_2}$ — электрическая постоянная двигателя обеспечивающего подачу; $T_{эм}{}^{(1)}=\dfrac{R_1J_1}{c_m{}^{(1)}c_e{}^{(1)}}$ — электромеханическая постоянная двигателя обеспечивающего вращение фрезы; $T_{эм}{}^{(2)}=\dfrac{R_2J_2}{c_m{}^{(2)}c_e{}^{(2)}}$ — электромеханическая постоянная двигателя, обеспечивающего подачу; $T_{KL}{}^{(1)}=\dfrac{K_1L_1}{c_m{}^{(1)}c_e{}^{(1)}}$ — постоянная двигателя, обеспечивающего вращение детали, связывающая частоту вращения двигателя со скоростью изменения силовой реакции в зоне резанья; $T_{KL}{}^{(2)}=\dfrac{K_2L_2}{c_m{}^{(2)}c_e{}^{(2)}}$ — постоянная двигателя, обеспечивающего подачу, связывающая частоту вращения ротора со скоростью изменения силовой реакции в зоне резанья; $T_{KR}{}^{(2)}=\dfrac{K_2R_2}{c_m{}^{(2)}c_e{}^{(2)}}$ — временная постоянная двигателя, обеспечивающая связь частоты вращения двигателя подачи с силовой реакцией в зоне резанья (в нашем случае K_2=K_r); $T_{KR}{}^{(1)}=\dfrac{K_1R_1}{c_m{}^{(1)}c_e{}^{(1)}}$ — временная постоянная двигателя, обеспечивающая связь частоты вращения двигателя вращения детали с силовой реакцией в зоне резанья.

Результаты эксперимента с учетом параметров, определенных ранее, представлены в виде временных зависимостей на рис. 2.

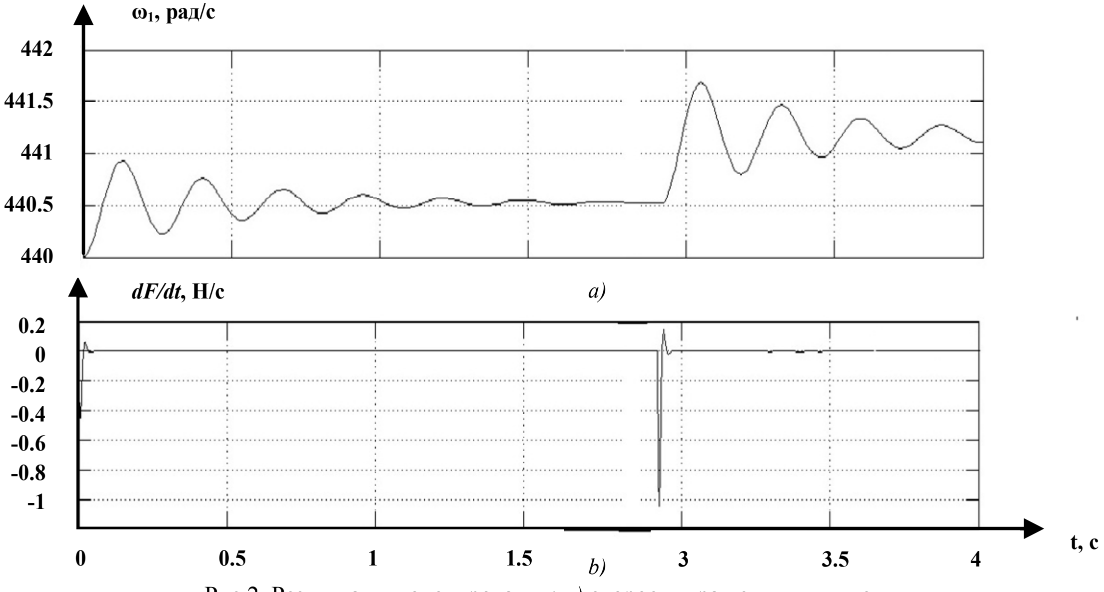


Рис.2. Результаты моделирования: *a)* скорость вращения шпинделя,
b) производная от сил реакции

Fig. 2 Simulation results: a) spindle speed,
b) reaction force derivative

Приведенные на рис. 2 временные характеристики являются: временной зависимостью скорости вращения детали (a) и характеристикой, отражающей изменение производной от сил реакции во времени (b). Как видно из приведенных на рис. 1 зависимостей, при достижении времени эксперимента близкого к 3-м секундам, блок для остановки процесса точения на величине подачи в 50 мм, срабатывает и отключает подачу. Сама силовая реакция на резанье, при условии принятых параметров системы резанья, достаточно невелика. Это обусловлено большими значениями скорости вращения и малыми значениями подачи. Так как изменения скорости вращения детали невелики, а скорость подачи слабо зависит от силы резанья, то и производная от силы реакции почти всегда равна нулю.

Для проверки верности принятой модели рассмотрим изменение жесткости заготовки (рис. 3).

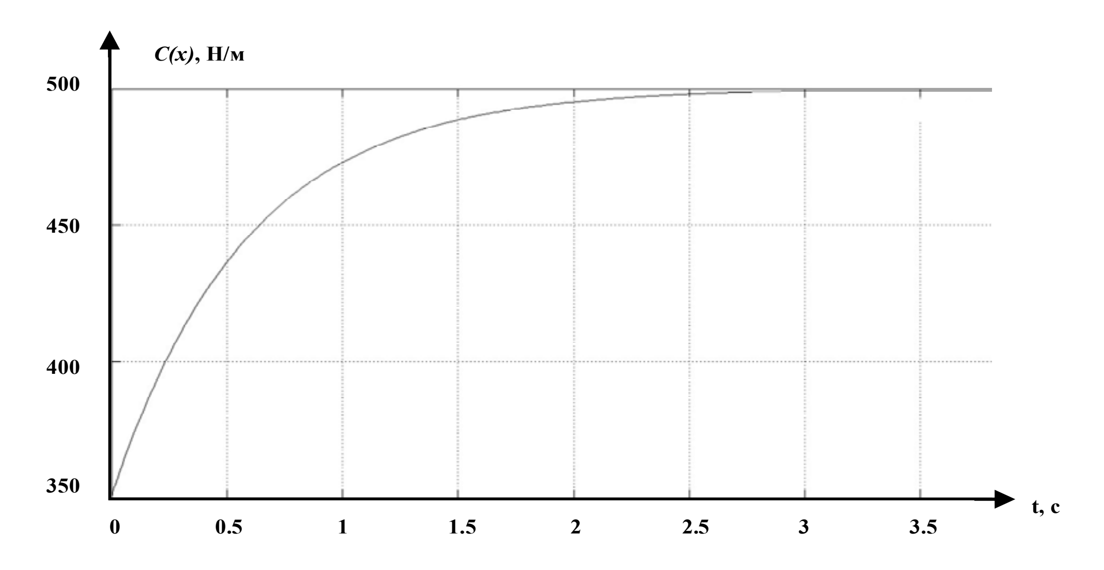


Рис.3. Изменение жесткости заготовки во времени

Fig.3. Variation of workpiece stiffness in time

Как видно из рис. 2, результаты моделирования в Matlab Simulink полностью повторяют наши предположения. Как уже говорилось ранее, изменение жесткости заготовки вдоль подачи приведет к неравномерному припуску обработки детали. Для оценки этой неравномерности выведем отношение силовой реакции к жесткости заготовки на отдельный рисунок (рис. 4).

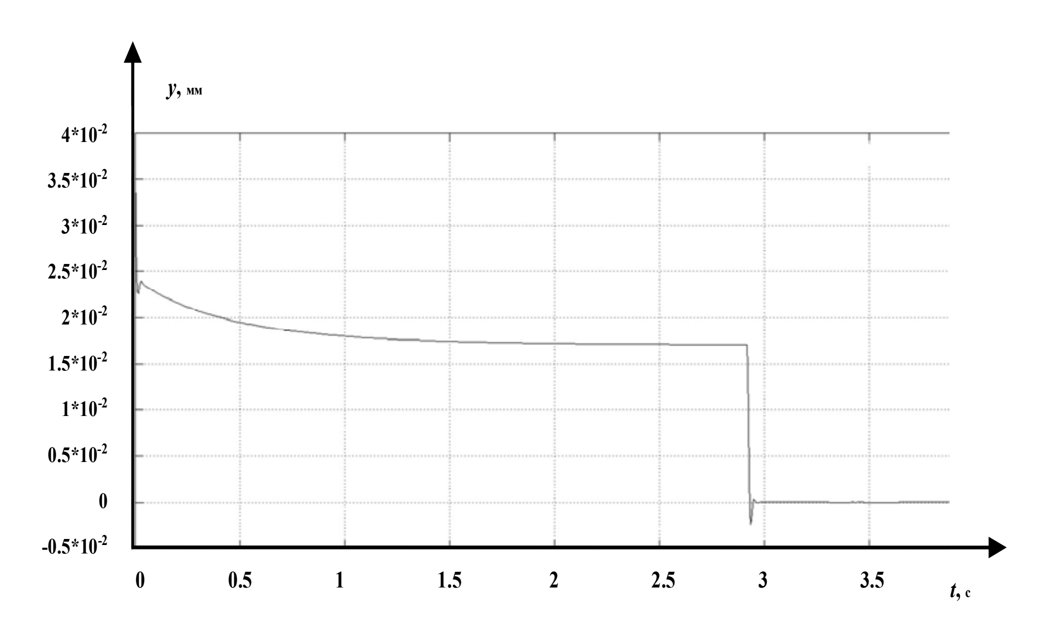


Рис.4. Изменения припуска по направлению движения подачи

Fig.4. Changes of allowance in the direction of feed movement

Как видно из рис. 4, величина *y* изменяется по мере подачи от значения в 2,6 $\cdot 10^{-5}$ до $1{,}7\cdot 10^{-5}$. Для некоторых деталей такая точность, вернее ее отсутствие, допустима. Поэтому задача обеспечения равномерного отклонения в вертикальном направлении детали по мере подачи является актуальной как с научной, так и практической точки зрения.

Перед тем, как приступить к синтезу системы управления оговорим задачи такого синтеза. Для обеспечения равномерного припуска при обработке детали нужно таким образом организовать изменение координат состояния процесса резанья (ω_1, ω_2), чтобы силовая реакция (2), возникающая в зоне резанья, изменялась вместе с изменением жесткости заготовки вдоль подачи. Так как изменения жесткости заготовки не являются функцией от координат состояния привода, обеспечивающего вращение детали, то справедливо было бы разделить движение, синтезировав управление только для привода, обеспечивающего подачу. Однако, полученные в предыдущем подразделе исследования, говорят о существенном влиянии изменений силовой реакции на скорость вращения фрезы. Действительно, моделирование, проведенное ранее (рис. 2), показало, что даже незначительные изменения силовой реакции, приводят к высокой колебательной реакции со стороны привода, обеспечивающего резанье, а целью управления будет как раз изменение этой реакции. С точки зрения последовательности событий, происходящих при резанье, будет выполняться следующая последовательность — изменения скорости подачи изменят силовую реакцию в зоне резанья, а эти изменения приведут к изменениям скорости вращения, которые в свою очередь приведут к новым изменениям силовой реакции и т.д. Приведенные рассуждения позволяют сделать вывод, что разделить движения в системе нельзя и, как следствие, нельзя синтезировать управление только для привода, обеспечивающего подачу. Для решения проблемы, озвученной выше, можно синтезировать управление для привода, обеспечивающего подачу и привода, обеспечивающего резанье одновременно. Задачи, решаемые ими при этом, могут быть различны. Привод, обеспечивающий вращение, должен решать задачу стабилизации скорости, а привод подачи будет, при условии стабильности скорости вращения, обеспечивать требуемые для равномерности обработки заготовки изменения силы резанья.

Для дальнейшего синтеза системы управления методом АКАР преобразуем исходную систему уравнений (см. систему (2)) в нормальную форму, для этого проведем следующие замены:

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega_1 \\ x_2 &= d\omega_1 / dt \\ x_3 &= \omega_2 \\ x_4 &= d\omega_2 / dt \end{aligned} \tag{3}$$

Учитывая систему (3), преобразуем (2) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{1}{T_{эм}{}^{(1)} T_э{}^{(1)}}\left[\frac{U_1}{Ce^{(1)}} - T_{эм}{}^{(1)} x_2 - x_1 - T_{KL}{}^{(1)} \frac{dF(x_1, x_3)}{dt} - T_{KR}{}^{(1)} F(x_1, x_3)\right] \\ \frac{dx_3}{dt} &= x_4 \\ \frac{dx_4}{dt} &= \frac{1}{T_{эм}{}^{(2)} T_э{}^{(2)}}\left[\frac{U_2}{Ce^{(2)}} - T_{эм}{}^{(2)} x_4 - x_3 - T_{KL}{}^{(2)} \frac{dF(x_1, x_3)}{dt} - T_{KR}{}^{(2)} F(x_1, x_3)\right] \end{aligned} \tag{4}$$

Отметим, что при верной записи дифференциальных уравнений в нормальной форме, в правой части системы не должны присутствовать производные по времени. На это нарушение пошли сознательно, так как подстановка раскрытых зависимостей $\frac{dF(x_1, x_3)}{dt}$ и $F(x_1, x_3)$ привела бы к чрезвычайному усложнению выражения (4). Поэтому представим $F(x_1, x_3)$ в виде следующего выражения:

$$F(x_1, x_3) = \frac{[350 + 150(1 - e^{-0.1K_r \int_0^t x_3 dt})]K_p x_3}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r \int_0^t x_3 dt})]x_1} \tag{5}$$

а $\frac{dF(x_1, x_3)}{dt}$ как:

$$\frac{dF(x_1,x_3)}{dt}=\frac{15(K_r x_3)^2 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt}}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]x_1}-\frac{[8.75+3.75(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})](K_r x_3)^2 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt}}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]x_1}+$$
$$+\frac{K_r x_4[350+150(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]x_1}-\frac{K_r x_3 x_2[350+150(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})](x_1)^2} \quad (6)$$

Таким образом, математическая модель системы в координатах состояния x_1, x_2, x_3, x_4 будет представлена системой (4) с учетом (5) и (6).

Для синтеза управления методом АКАР введем Агрегированные макропеременные, которые выберем из соображений, связанных с желаемыми режимами движения нашей системы, то есть с обеспечением стабилизации скорости вращения фрезы и равномерности обработки заготовки. Макропеременные обозначаются как $\psi(x_1, x_2,..., x_n)$, а в терминах синергетики — это «задаваемые параметры порядка, путем оптимизации которых можно добиваться желаемого поведения динамических систем» [6–10]. В качестве агрегированных макропеременных, обеспечивающих асимптотическое притягивание скорости вращения заготовки к требуемому (стабилизированному) значению, введем макропеременные ψ_1, ψ_2, которые будут находиться как:

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= x_1 - x_{01}\\ \Psi_2 &= x_2 - \varphi_2(x_1)\end{aligned}, \quad (7)$$

где x_{01} — требуемое (стабилизированное) значение скорости вращения фрезы.

Агрегированные макропеременные ψ_3, ψ_4 введем как:

$$\begin{aligned}\Psi_3 &= F(x_{01}, x_3)/c(x_3) - y_0\\ \Psi_4 &= x_4 - \varphi_4(x_3)\end{aligned} \quad (8)$$

где y_0 — допустимое значение отклонения припуска при обработке заготовки фрезерованием. Макропеременную ψ_3, преобразовав отношение $F(x_{01}, x_3)/c(x_3)$, можно переписать так:

$$\Psi_3=\frac{K_p x_3}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]x_{01}}-y_0 \quad (9)$$

Синтез системы управления позволит обеспечить асимптотическое притяжение движений системы к желаемым инвариантным многообразиям. То есть будет справедливо, что введенные макропеременные будут стремиться к нулю, или, другими словами, $x_1 \to x_{01}$, $x_2 \to \varphi_2(x_1)$, $\frac{K_p x_3}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]x_{01}} \to y_0$, $x_4 \to \varphi_4(x_3)$. Для обеспечения асимптотического притяжения движений системы к желаемым инвариантным многообразиям, примем следующий закон изменения введенных макропеременных:

$$\begin{aligned}T_1\frac{d\Psi_1}{dt}+\Psi_1&=0\\ T_2\frac{d\Psi_2}{dt}+\Psi_2&=0\\ T_3\frac{d\Psi_3}{dt}+\Psi_3&=0\\ T_4\frac{d\Psi_4}{dt}+\Psi_4&=0\end{aligned}, \quad (10)$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 — постоянные времени, обеспечивающие требуемую скорость притяжения движений системы к желаемым инвариантным многообразиям.

После подстановки в первые два выражения системы (10) выражений (9), получим:

$$\begin{aligned}T_1\frac{dx_1}{dt}+x_1-x_{01}&=0\\ T_2[\frac{dx_2}{dt}-\frac{d\varphi_2(x_1)}{dt}]+x_2-\varphi_2(x_1)&=0\end{aligned} \quad (11)$$

В первом уравнении в (11) произведем замену, используя первое выражение системы (4). После этого полу-

чим $T_1 x_2 + x_1 - x_{01} = 0$, а учитывая то, что $x_2 \to \varphi_2(x_1)$ запишем:

$$T_1 \varphi_2(x_1) + x_1 - x_{01} = 0 \tag{12}$$

Из выражения (12) найдем $\varphi_2(x_1) = \frac{x_{01} - x_1}{T_1}$. После этого, подставив полученное значение во второе выражение системы (9), получим:

$$T_2[\frac{dx_2}{dt} + \frac{1}{T_1}\frac{dx_1}{dt}] + x_2 - \frac{x_{01} - x_1}{T_1} = 0 \tag{13}$$

или после подстановки значений первых производных из системы (4) получим:

$$T_2\{[\frac{1}{T_{эм}{}^{(1)} T_э{}^{(1)}}[\frac{U_1}{Ce^{(1)}} - T_{эм}{}^{(1)} x_2 - x_1 - T_{KL}{}^{(1)}\frac{dF(x_1, x_3)}{dt} - T_{KR}{}^{(1)} F(x_1, x_3)] + \frac{1}{T_1} x_2\} + \\ + x_2 + \frac{x_1}{T_1} - \frac{x_{01}}{T_1} = 0 \tag{14}$$

Из выражения (14) выведем функциональную зависимость $U_1 = f(x_1, x_2, x_3)$ в виде следующего выражения:

$$U_1 = Ce^{(1)}\{T_{эм}{}^{(1)} x_2[1 - \frac{T_э{}^{(1)}(T_1 + T_2)}{T_1 T_2}] + x_1(1 - \frac{T_{эм}{}^{(1)} T_э{}^{(1)}}{T_1 T_2}) + T_{KL}{}^{(1)}\frac{dF}{dt} + T_{KR}{}^{(1)} F + \frac{T_{эм}{}^{(1)} T_э{}^{(1)}}{T_1 T_2} x_{01}\} \tag{15}$$

Для синтеза управления привода, обеспечивающего подачу, воспользуемся двумя последними уравнениями системы (10). Начнем рассмотрение с предпоследнего уравнения системы (10), подставив в него значение макропеременной из (9). Для раскрытия этого выражения определим значение производной от третьей макропеременной как:

$$\frac{d\Psi_3}{dt} = \frac{K_p}{x_{01}}\{\frac{x_4}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]} - \frac{0.025 K_p x_3 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt}}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]^2}\} \tag{16}$$

С учетом (13) и (15) третье уравнение системы (10) примет следующий вид:

$$\frac{T_3 K_p}{x_{01}}\{\frac{x_4}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]} - \frac{0.025 K_p x_3 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt}}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]^2}\} + \\ + \frac{K_p x_3}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})] x_{01}} - y_0 = 0 \tag{17}$$

Учитывая тот факт, что $x_4 \to \varphi_4(x_3)$, проведем замену в выражении (17) и получим:

$$\frac{T_3 K_p}{x_{01}}\{\frac{\varphi_4(x_3)}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]} - \frac{0.025 K_p x_3 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt}}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]^2}\} + \\ + \frac{K_p x_3}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})] x_{01}} - y_0 = 0 \tag{18}$$

Из (18) выделим значение $\varphi_4(x_3)$ и получим:

$$\varphi_4(x_3) = \frac{0.025 K_p x_3 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt}}{[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]} - \frac{x_3}{T_3} + \frac{y_0 x_{01}[1.6 + 0.25(1 - e^{-0.1K_r\int_0^t x_3 dt})]}{T_3 K_p} \tag{19}$$

Для того чтобы раскрыть последнее выражение системы (10), определим производную по времени от выражения (19), которая будет равна:

$$\frac{d\varphi_4(x_3)}{dt}=\frac{0.025K_p x_4 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt}}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]}+\frac{0.000625(K_p x_3)^2 e^{-0.2K_r\int_0^t x_3dt}}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]^2}-$$
$$-\frac{0.0025(K_p x_3)^2 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt}}{[1.6+0.25(1-e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt})]}-\frac{x_4}{T_3}+\frac{y_0 x_{01}0.025x_3 e^{-0.1K_r\int_0^t x_3dt}}{T_3} \quad (20)$$

Учитывая полученную зависимость $\varphi_4(x_3)$ и $\frac{d\varphi_4(x_3)}{dt}$, раскроем последнее выражение системы (10) и получим:

$$T_4[\frac{dx_4}{dt}-\frac{d\varphi_4(x_3)}{dt}]+x_4-\varphi_4(x_3)=0\,, \quad (21)$$

или с учетом последнего выражения системы (6):

$$T_4\{\frac{1}{T_{эм}{}^{(2)}T_э{}^{(2)}}[\frac{U_2}{Ce^{(2)}}-T_{эм}{}^{(2)}x_4-x_3-T_{KL}{}^{(2)}\frac{dF(x_1,x_3)}{dt}-T_{KR}{}^{(2)}F(x_1,x_3)]-\frac{d\varphi_4(x_3)}{dt}\}+$$
$$+x_4-\varphi_4(x_3)=0, \quad (22)$$

где $\frac{dF(x_1,x_3)}{dt}$, $F(x_1,x_3)$, $\frac{d\varphi_4(x_3)}{dt}$, $\varphi_4(x_3)$ определяются по ранее полученным выражениям. Из (10) выведем U_2, получим:

$$U_2=Ce^{(2)}[T_{эм}{}^{(2)}x_4+x_3+T_{KL}{}^{(2)}\frac{dF(x_1,x_3)}{dt}+T_{KR}{}^{(2)}F(x_1,x_3)+T_{эм}{}^{(2)}T_э{}^{(2)}\frac{d\varphi_4(x_3)}{dt}-$$
$$-\frac{T_{эм}{}^{(2)}T_э{}^{(2)}}{T_4}x_4+\frac{T_{эм}{}^{(2)}T_э{}^{(2)}}{T_4}\varphi_4(x_3)] \quad (23)$$

Для анализа процессов, возникающих при реализации разработанных законов управления, была построена модель синтезированной системы в среде Matlab Simulink, результаты моделирования системы в которой, с точки зрения обеспечения качества обработки, представлены рис. 5.

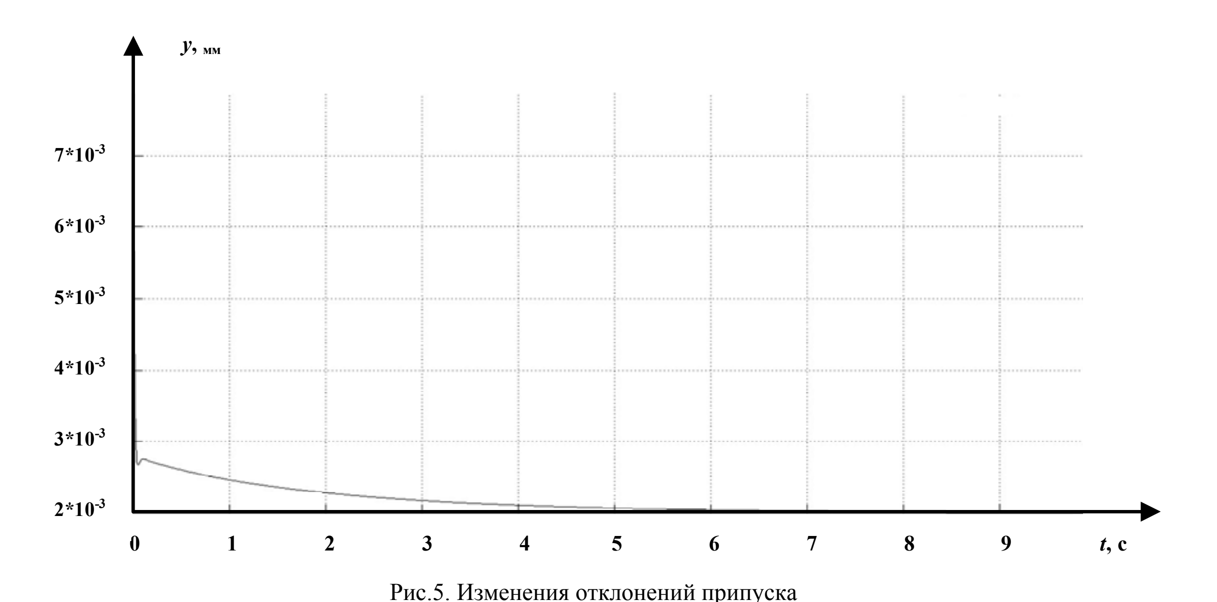


Рис.5. Изменения отклонений припуска

Fig.5. Changes in allowance deviations

Сравнительный анализ зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, позволяет констатировать существенное повышение точности обработки, при этом синтезированное управление системой асимптотически приближает отклонение припуска к значению, которое задавалось как одна из констант по каналу управления скоростью подачи.

Вывод: Синтезированная методом АКАР система управления позволяет стабилизировать скорость вращения заготовки и качественно повысить точность обработки детали.

Библиографический список

1. Лапшин, В. П. Оценка влияния скорости подачи, на равновесные режимы привода обеспечивающего фрезерование заготовки переменной толщины/ В. П. Лапшин, Р. А. Тюняев, В. В. Христофорова // Динамика технических систем, сб. трудов 12-й междунар. научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 2016. — С.180–184.

2. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D. The problems of control of the evolution of dynamic system interacting with the medium. International Journal of Mechanical Engineering and Automation. 2014. — Vol. 1, no. 5. — P. 271-285.

3. Anh, N.D., Zakovorotny, V.L., Hao, D.N. Van der Pol-Duffing oscillator under combined harmonic and random excitations. Vietnam Journal of Mechanics. 2014. — Vol. 36, no. 3. — P. 161-172.

4. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D., Gubanova, A.A., Hristoforova, V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. Journal of Sound and Vibration, 2016. — Vol. 368. — P. 174-190.

5. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D. Parametric phenomena in processing control on machine-tools. 6th International Scientific Conference “Applied Sciences and Technologies in the United States and Europe: Common Challenges and Scientific Findings”, 2014, pp. 113-118.

6. Lapshin, V.P., Turkin, I.A. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes. Russian Engineering Research, 2015. — Vol. 35, no. 10. — P. 795-797.

7. Колесников, А. А. Современная прикладная теория управления : синергетический подход в теории управления/ А. А. Колесников. — Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. — 68 с.

8. Синергетика и проблемы теории управления. / Под ред. А. А. Колесникова. — Москва : Физматлит, 2004. — 504 с.

9. Заковоротный, В. Л. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода/ В. Л. Заковоротный, В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Технические науки. — 2014. — №3(178). — 33–41 с.

10. Лапшин, В. П. Влияние свойств сервопривода шпинделя на динамику сверления глубоких отверстий малого диаметра/ В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2013. — №5–6(74). — С.125 – 130.

References

1. 1. Lapshin, V.P., Tyunyaev, R.A., Khristoforova, V.V. Otsenka vliyaniya skorosti podachi, na ravnovesnye rezhimy privoda obespechivayushchego frezerovanie zagotovki peremennoy tolshchiny. [Assessing impact of feed rate on equilibrium drive mode providing tapered workpiece milling.] Dinamika tekhnicheskikh system: sb. trudov 12-y mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. [Dynamics of technical systems: Proc. 12th Int. Sci.-Tech. Conf.] Rostov-on-Don, 2016, pp. 180–184 (in Russian).

2. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium. International Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 271–285.

3. Anh, N.D., Zakovorotny, V.L., Hao, D.N. Van der Pol-Duffing oscillator under combined harmonic and random excitations. Vietnam Journal of Mechanics, 2014, vol. 36, no. 3, pp. 161-172.

4. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D., Gubanova, A.A., Hristoforova, V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. Journal of Sound and Vibration, 2016, vol. 368, pp. 174-190.

5. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D. Parametric phenomena in processing control on machine-tools. 6th International Scientific Conference “Applied Sciences and Technologies in the United States and Europe: Common Challenges and Scientific Findings”, 2014, pp. 113-118.

6. Lapshin, V.P., Turkin, I.A. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes. Russian Engineering Research, 2015, vol. 35, no. 10, pp. 795-797.

7. Kolesnikov, A.A. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya. [Modern management applied theory: synergistic approach to control theory.] Taganrog: TSRU Publ. House, 2000, 68 p. (in Russian).

8. Kolesnikov, A.A., ed. Sinergetika i problemy teorii upravleniya. [Synergetics and problems of control theory.] Moscow: Fizmatlit, 2004, 504 p. (in Russian).

9. Zakovorotny, V.L., Lapshin, V.P., Turkin, I.A. Upravlenie protsessom sverleniya glubokikh otverstiy spiral'nymi sverlami na osnove sinergeticheskogo podkhoda. [Process control drilling deep holes twist drills based on the synergetic approach.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2014, no. 3 (178), pp. 33–41. (in Russian).

10. Lapshin, V.P., Turkin, I.A. Vliyanie svoystv servoprivoda shpindelya na dinamiku sverleniya glubokikh otverstiy malogo diametra. [Effect of spindle servo drive properties on drilling dynamics of deep pinholes.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 5–6(74), pp.125–130 (in Russian).

Поступила в редакцию 04.10.2016
Сдана в редакцию 04.10.2016
Запланирована в номер 11.01.2017

Received 04.10.2016
Submitted 04.10.2016
Scheduled in the issue 11.01.2017

Об авторах:

Лапшин Виктор Петрович, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5114-0316,
i090206.lapshin@yandex.ru

Христофорова Вероника Владимировна, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0583-6654,
Nikaapp@rambler.ru

Бабенко Татьяна Сергеевна, ассистент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4420-0074 ,
Tanya-babenko_2017@mail.ru

Authors:

Lapshin. Victor P., associate professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5114-0316,
i090206.lapshin@yandex.ru

Khristoforova, Tatyana S., associate professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0583-6654,
Nikaapp@rambler.ru

Babenko, Veronika V., associate of Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4420-0074 ,
Tanya-babenko_2017@mail.ru